

高均衡量微带宽带功率均衡器*

张 勇, 薛 凯

(电子科技大学 电子工程学院, 成都 610054)

摘 要: 对用于行波管驱动级的高均衡量微带宽带功率均衡器进行了研究,提出了一种切实可行的电路拓扑。该电路利用并联谐振枝节形成带阻特性,用集总参数电阻实现了对衰减量的调节,形成类似陷波器的效应,用紧凑的结构实现了器件的小型化。针对一种 X 到 Ku 频段均衡量达到 20 dB 的增益曲线,采用上述拓扑结构,进行了仿真研究和实物制作,最终实现满足要求的宽带微波功率均衡器。该均衡器具有宽带宽、高均衡量和小体积的特点。

关键词: 功率均衡器; 微带; 行波管; 宽带

中图分类号: TN715; TN455 **文献标志码:** A

雷达、干扰机已成为现代战争的重要装备,行波管和大功率固态功率放大器作为这些装备的核心,其技术水平决定了这些装备的战术性能^[1-2]。但由于种种原因,大功率宽带行波管在工作频带内往往存在较大的增益波动,不能满足要求。目前可行的解决办法是采用管外均衡技术,即引入一个均衡网络,这个网络的特性恰好与信号的畸变特性相反,这样就可以使信号不发生幅度畸变,插入的这个网络就是功率均衡器,也就是预先补偿信号的畸变^[3]。

一般情况下,功率均衡器都是无源的,均衡特性就是具有频率选择的衰减特性,实现这种功率均衡器主要有两个方法:一是使用隔离器+无耗均衡网络,使得均衡器反射回来的能量在隔离器中吸收掉;二是使用有耗均衡网络,适当的设计使得均衡器能同时满足所提到的两点技术要求。带有隔离器的功率均衡器使用均衡网络,增加了隔离器,增大了体积,引入了损耗,不易于与电路集成,而且宽带的隔离器本身实现困难。而使用有耗匹配均衡网络的功率均衡器却具有体积小、易于系统集成等优点,实际应用更为广泛。

传统上,使用有耗网络的均衡器往往采用波导、同轴及一些特殊的腔体结构。信息工程大学已经设计制作了 Ku 波段波导谐振腔微波均衡器和同轴谐振腔微波均衡器,将原来的行波管增益频率起伏从十几 dB 均衡到 3 dB 以内,并且驻波系数小于 1.5,但这类腔体结构的功率均衡器的体积大,结构复杂,机械稳定性和热稳定性差,精确设计和仿真困难,不便于系统集成^[4-5]。而微带电路可以灵活地形成电路,采用微带电路构成的均衡器可以使用复杂的电路拓扑,以便得到精确的均衡响应曲线。通过合理的设计,微带均衡器还可以与匹配电路进行一体化设计。由于微带功率均衡器便于在固态组件内部安装,易于与固态放大器形成一体,且方便可调,使得它在微波功率模块(MPM)中的应用更加具有优势^[6-7]。

本文针对一种 X 到 Ku 频段的行波管,设计并制作了相应的微带宽带功率均衡器。

1 物理模型

功率均衡器的频率衰减特性类似于一种“钟型”响应,形式与陷波器近似。因此,考虑从陷波器出发来讨论实现宽带微波功率均衡器的电路拓扑结构。图 1 是由 R, L 和 C 组成的一种简单的接地串联回路以及其频率响应特性,图 1(b)中的 ω_u, ω_l 分别代表频率响应特性的上、下截止角频率。从图 1(b)可以看出,它实际上是个陷波器。调节 L 和 C 可以调节其谐振频率,调节 R 可以调整谐振回路的 Q 值,从而调整它的最大衰减及波形的宽窄。将多级谐振回路级联起来形成级联网络,如图 2 所示,级联网络的 T 矩阵为

$$T = \prod_{i=1}^n [T]_i \quad (1)$$

* 收稿日期:2007-07-04; 修订日期:2008-06-19

基金项目:电子科技大学青年基金重点项目

作者简介:张 勇(1975—),男,博士,副教授,主要从事微波和毫米波集成电路研究,太赫兹固态电路研究;yongzhang@uestc.edu.cn。

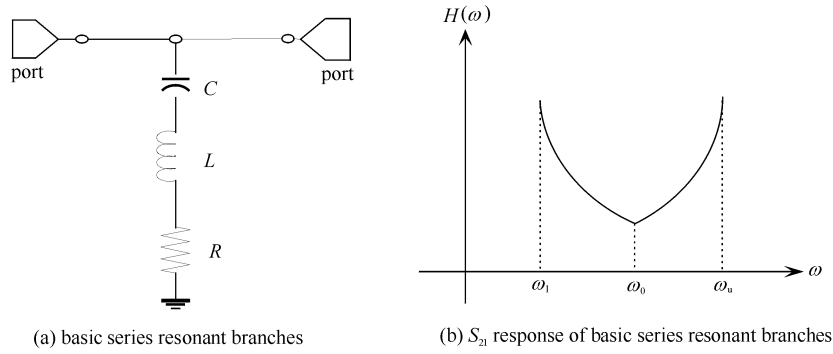


Fig. 1 Response of basic series resonant circuit

图 1 对地基本串联谐振电路响应

然后由 T 矩阵和 S 矩阵的关系

$$S = \begin{bmatrix} \frac{T_{12}}{T_{22}} & T_{11} - \frac{T_{12} T_{21}}{T_{22}} \\ \frac{1}{T_{22}} & -\frac{T_{21}}{T_{22}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

就可以得到级联网络的 S 矩阵。

如果每一级陷波器的输入输出都是匹配的,可以证明级联网络的 S_{21} 可以写成

$$S_{21}(\omega) = \prod_{i=1}^n S_{21,i}(\omega) \quad (3)$$

写成插入衰减的形式为

$$L(\omega) = \prod_{i=1}^n L_i(\omega) \quad (4)$$

式(4)可以看成是以陷波器响应作为基函数的某个响应波形的级数展开。根据级数展开理论,用无限多的陷波器响应可以合成任意的响应波形。因此,可以设想以对地串联谐振陷波器单元作为基本的电路形式,适当选择各陷波器单元的谐振频率、 Q 值以及级联数目,就可以逼近我们需要的均衡响应。

因此,在理论上我们证明了采用基本陷波器单元实现功率均衡器的可行性,对于行波管前级或微波功率模块中使用的功率均衡器,需要采用分布参数电路来实现这种陷波器单元,通过适当的级联,最终实现微波功率均衡器。

2 用微带线实现陷波器响应

对于 MPM 中使用的宽带微波功率均衡器,要求高可靠性和小体积,因此陷波器单元最终希望用微带电路来实现。一段微带终端短路或者开路无耗传输线,它的输入阻抗为

$$Z_{in} = \begin{cases} jZ_0 \tan(\beta L) & \text{short terminal} \\ -jZ_0 \cotan(\beta L) & \text{open terminal} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Z_0 为微带线的特性阻抗; β 为传播常数。

由式(5)可以看到,一段无耗短截线的输入阻抗为纯虚数,随着长度的变化,短截线可以表现为感性、并联谐振、容性和串联谐振等特性。对于一段微带终端短路或者开路无耗传输线构成的微带谐振回路,损耗很小,可以看作是无耗的,而陷波响应要求其中要有一个电阻 R 调节谐振回路的 Q 值。因此在传输线网络上加上适当的损耗电阻时,就可以在中心频率附近得到陷波器的响应。对于终端开路线,加载电阻后的微带电路枝节结构如图 3 所示,其中 λ 为波长。

控制微带短截线的长度和宽度可以控制枝节的谐振频率,控制加载电阻 R 可以控制 Q 值。以上的分析表明,利用电阻加载微带开路短截线可以

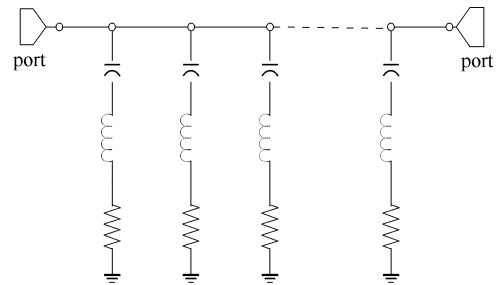


Fig. 2 Cascade network of wave-trap

图 2 陷波器的级联网络

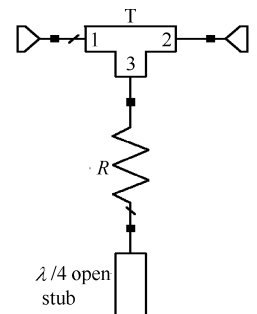


Fig. 3 Resistance-loaded open stub

图 3 电阻加载开路短截线

实现基本的陷波器单元,并且通过改变短截线长度、宽度以及加载电阻 R 的大小就可以改变陷波器单元的谐振频率和衰减量的大小。因此,可以将这样的微带陷波器单元选择适当的级数通过适当的级联来实现行波管前级的“钟型”响应功率均衡器。

3 微带功率均衡器的仿真设计

利用计算机直接优化的方法实现功率均衡器的关键就在于寻找一种灵活、通用、快速以及小体积的电路拓扑,利用该拓扑结构通过计算机优化可以得到满足行波管要求的微波功率均衡器。

前面从微带陷波器出发,讨论了用微带陷波器构成均衡器的可能性。从理论上讲,我们可以用增加或减少微带陷波器、更改元件参数值等方法,获得任意的响应。但在具体实现时,由于各种损耗的存在,使得谐振器的 Q 值不可能做得很大;为了电路小型化和便于系统集成,电路物理尺寸总是有限的,不可能做出任意多的谐振器,实际上可以采用的陷波器非常有限,通常为 2~6 个;工艺上微带线的宽度也不可能做到任意尺寸。考虑到以上因素,因此在实际实现功率均衡器的电路拓扑中,陷波器单元的数目以及形式会受到一些限制。

上面的分析只涉及到均衡器的传输函数,还没有考虑回波损耗 S_{11} 和 S_{22} 。为了使均衡器在系统中能正常工作,必须使得均衡器的回波损耗尽可能的小,所以在均衡器的输入、输出端还应该引入阻抗匹配电路。在微带电路中,比较适用的匹配电路有阶梯匹配电路和枝节匹配,在微带功率均衡器中可以综合使用这两种匹配方式,以获得良好的匹配。

本文中设计的宽带均衡器,均衡量在 20 dB 以上,并且在中心频率 f_0 附近的 3 GHz 范围内要求有平坦的衰减量。考虑到该均衡器的均衡量指标要求较高,我们采用了 5 级陷波器单元,具体的拓扑结构如图 4 所示。

在图 4 中,电路拓扑可分成 3 个部分:枝节谐振器、输入匹配电路和输出匹配电路。其中枝节电阻为每个谐振器提供衰减调节并充当耦合电阻。输入输出采用阶梯阻抗匹配网络,采用 3 节匹配阶梯,也可根据实际的要求,调整匹配枝节的数目。

电路仿真采用 AWR Microwave Office,它具有速度快、效率高的优点,但由于其基于等效电路模型,该等效模型有一定的频率使用范围,根据之前的仿真及测试经验,在高于 10 GHz 时的仿真结果与实际电路测试偏差较大;而尽管电磁场仿真的精度很高,但其仿真及优化速度远远低于电路仿真,因而我们采用电路仿真与电磁场仿真相结合的方法,前者给出初值,后者进行精确仿真,在保证精度的情况下提高了效率。我们采用了 CST Microwave Studio 进行电磁场仿真,经过计算机优化,仿真结果和目标吻合较好,其比较曲线如图 5 所示。

4 测试结果与分析

在上述研究的基础上,根据工程需要,设计和制作了微带均衡器,体积为 50 mm×22 mm×10 mm,实物照片如图 6 所示,实际制作的均衡器采用矢量网络分析仪进行了测试,将实测的 S_{21} 曲线和 CST 仿真结果进行了对比(图 7),其结果吻合得较好。实际测试结果表明,均衡器可将行波管带内增益波动均衡到小于 2 dB,其驻波系数小于 2;均衡器的带宽较宽,达 12 GHz;且在中心频率 f_0 附近 3 GHz 的带宽得到较平坦的均衡曲线。同时,接入均衡器后,可使行波管在工作频段内工作在接近饱和状态,大幅度减小行波管的输出增益波动,满足了实际应用要求。

5 结 论

本文采用微带电路,利用计算机优化设计方法,研制出用于微波宽带行波管的功率均衡器。其特点是:具有三倍频程的宽频带;体积较小;在保证高端损耗较小的前提下,均衡量达到 20 dB;在中心频率附近的 3 GHz 范围内得到较平坦的均衡曲线;在保证高均衡量的前提下,驻波和插入损耗满足了指标要求。同时,该均衡器

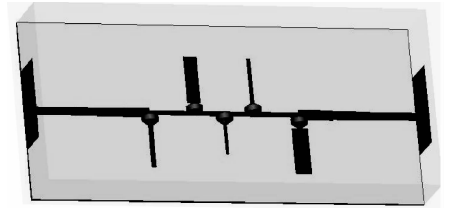


Fig. 4 Topology of equalizer

图 4 拓扑结构的示意图

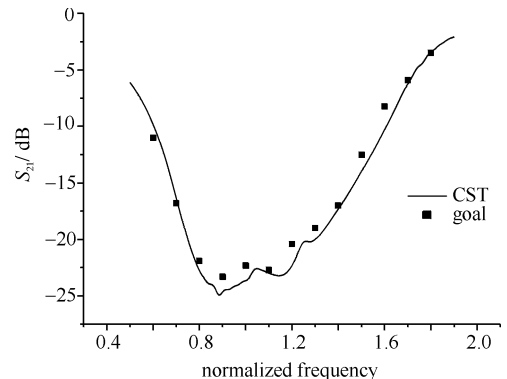


Fig. 5 Simulated results by electromagnetic code

图 5 电磁场仿真结果

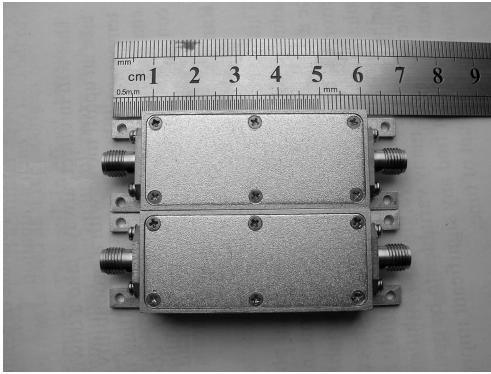


Fig. 6 Picture of equalizer

图 6 均衡器实物图

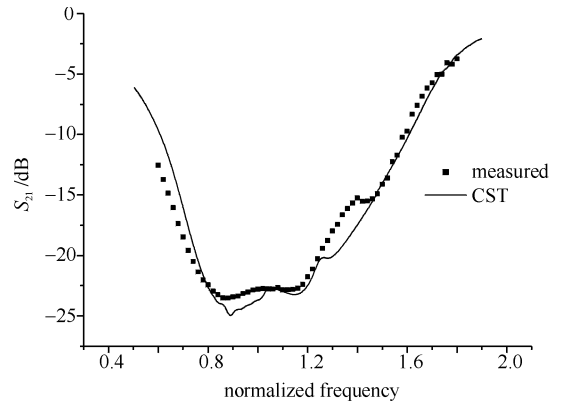


Fig. 7 Comparison between measured results and simulated results by CST code

图 7 S_{21} 测试结果与 CST 仿真曲线的对比

的测试结果与场仿真结果吻合得较好。该均衡器的成功研制,说明采用微波混合集成电路完全可以满足行波管对功率均衡的指标要求。该微带功率均衡器对解决行波管输出功率不平坦的问题以及满足 MPM 中均衡器的小型化要求都具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1] 殷海荣, 宫玉彬, 魏彦玉, 等. 毫米波沟道梯型慢波结构行波管的线性理论[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(10):1663-1668. (Yin H R, Gong Y B, Wei Y Y, et al. Linear theory of tunneladder traveling wave tubes. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10):1663-1668)
- [2] 张勇, 莫元龙. 翼片加载螺旋带慢波结构的损耗特性[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(10): 1299-1303. (Zhang Y, Mo Y L. Study on the loss characteristics of the vane-loaded helical slow-wave structures. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(10): 1299-1303)
- [3] 吕昌, 牛忠霞, 周东方, 等. 大功率行波管用微波均衡器[J]. 信息工程学院学报, 1998, **17**(4):33-36. (Lü C, Niu Z X, Zhou D F, et al. Microwave equalizer for the power traveling-wave tube. *Journal of Information Engineering Institute*, 1998, **17**(4):33-36)
- [4] 樊中山, 单严. 微波幅度均衡器的设计和优化分析[J]. 西安通信学院学报, 2004, **3**(5):22-24. (Fan Z S, Shan Y. The designing and optimizing of microwave amplitude coaxial equalizer. *Journal of Xi'an Communication Institute*, 2004, **3**(5):22-24)
- [5] 洪家振, 卢欣, 任青圃, 等. 一种微波幅度均衡器的设计与仿真[J]. 计算机仿真, 2006, **23**(1):291-293. (Hong J Z, Lu X, Ren J P, et al. Design and simulation of a microwave equalizer. *Computer Simulation*, 2006, **23**(1):291-293)
- [6] 鲍争光, 任青圃, 牛忠霞. 电阻加载的螺旋形谐振器在微带均衡器中的应用[J]. 微波学报, 2005, **21**(s0):142-145. (Bao Z G, Ren J P, Niu Z X. A resistor loaded spiral resonator and its application to microstrip equalizer. *Journal of Microwaves*, 2005, **21**(s0):142-145)
- [7] 俞泉. 微波、毫米波功率模块固态放大驱动技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006. (Yu Q. Research on the technology of solid-state power driver of MPM and MMPM, masterate dissertation. Chengdu: University of Electronics Science and Technology of China, 2006)

Microstrip power equalizer with great equal range

ZHANG Yong, XUE Kai

(School of Electronic Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A great equal range microstrip power equalizer was studied and a kind of circuit topology was proposed. In the circuit, the parallel stub resonator was used to get band-stop effect, and the resistor was used to modify the attenuation character. Furthermore, a compact structure was employed. Using the above circuit topology, an attenuation curve of equal range up to 20 dB was fulfilled to satisfy a traveling wave tube(TWT) covering X and Ku frequency band. The simulation and its implementation have been carried out. The measured results of the equalizer agree with the simulation results very well. The equalizer has the characteristic of wide bandwidth, great equal range and compact size.

Key words: Power equalizer; Microstrip; Traveling wave tube; Wide band